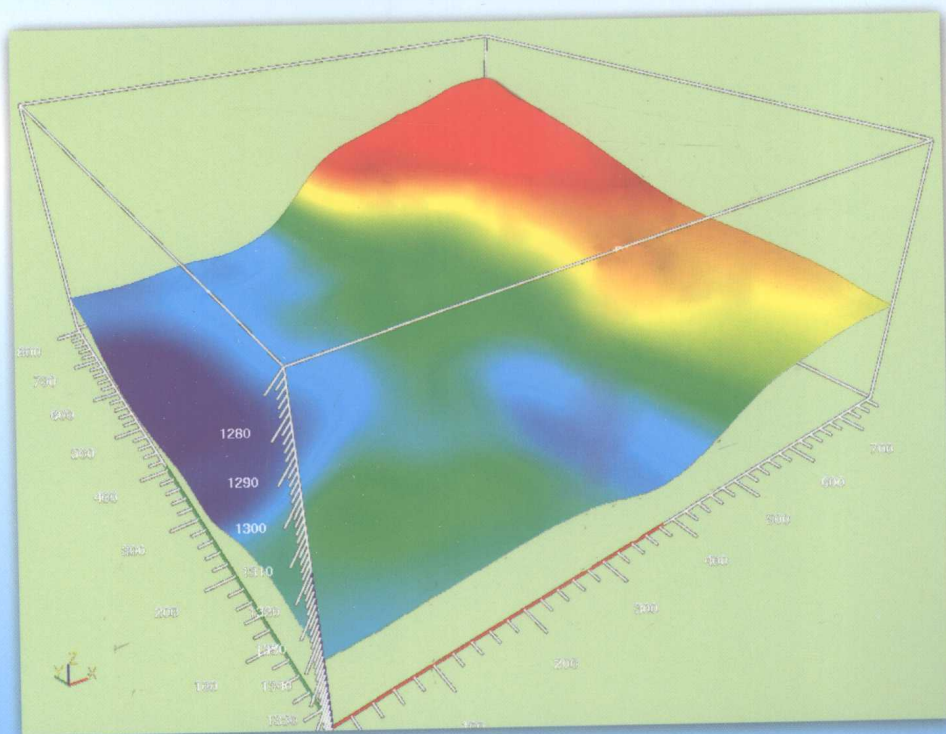


高分辨率层序地层学 与河流相储层流动单元研究

——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例

唐民安 著



GAOFENBIANLV CENGXUDICENGXUE
YU HELIUXIANGCHUCENG LIUDONGDANYUAN YANJIU

地质出版社

高分辨率层序地层学 与河流相储层流动单元研究

——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例

唐民安 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以致密天然气储层为研究对象,详细介绍了冲积河流相的层序划分对比、沉积相精细分析、储层综合预测、储层非均质性分析、流动单元识别与评价的基本原理与研究方法。

本书可供从事油气田勘探与开发的科研人员参考使用,也可供相关专业的高等院校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率层序地层学与河流相储层流动单元研究:以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例 / 唐民安著. —北京:地质出版社, 2008. 7

ISBN 978-7-116-05751-7

I. 高… II. 唐… III. ①鄂尔多斯盆地-地层层序-研究
②鄂尔多斯盆地-河流相-储集层-研究 IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 112822 号

责任编辑:孙亚芸

责任校对:郑淑艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010)82324508 (邮购部); (010)82324569 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zhs@gph.com.cn

传 真: (010)82310759

印 刷: 北京地大彩印厂

开 本: 787 mm × 1092 mm 1/16

印 张: 11.5

字 数: 300 千字

印 数: 1—800 册

版 次: 2008 年 7 月北京第 1 版 · 第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-05751-7

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

由于河流相沉积具有别于湖、海相沉积的特殊性，难以用传统的地震层序分析方法来进行层序划分与解释，因此，河流相等时地层格架的建立及河流相储层的预测研究一直是地质学家研究的热点与难点问题。

以 T. A. Cross 为代表的高分辨率层序地层学，将层序地层学与沉积学理论紧密结合起来，运用地层基准面、体积分配、相分异等基本原理，为盆地中沉积物的堆积、侵蚀、无沉积作用、沉积物路过的历史提供了一个与沉积环境和海平面变化无关的参考框架，从而使层序地层分析摆脱了必须与海平面变化相联系的束缚，为冲积—河流相等时地层格架内低级次层序划分和对比提供了客观的自然法则。

河流相砂体具有垂向多层次叠置、侧向分割性强、砂体规模小、岩性变化快、非均质性强等典型陆相储层的沉积学特征，一直困扰着油气勘探、开发中储层的划分与对比。

我国在近 10 多年中，以邓宏文、郑荣才教授为代表的高分辨率层序地层专家在将高分辨层序地层的理论运用于我国含油气盆地储层预测的实践中，不仅极大地丰富和发展了高分辨率层序地层学理论，而且对我国广泛分布的河流相地层的小层划分与对比、沉积相精细分析、储层建筑结构分析、储层非均质性分析及储层流动单元研究具有重要的指导意义。

储层流动单元是指具有相似沉积特征、成岩特征、岩石物理性质和流体渗流特征并可作图的三维单元体，是 20 世纪 80 年代中后期在国内外石油界逐渐流行起来的一个新概念，主要是用来定量描述和评价储层的岩石物理性质，在油气勘探与开发中起着重要的作用。

目前流动单元的研究方法大体分为两种类型。第一类是以数学手段为主的储层参数分析法，广泛应用储层中的各种地质参数，通过单井中密集取样的聚类分析寻找划分流动单元的有效参数和定量界限，然后直接在整套储层中定量划分流动单元。这类方法仅仅需要做少量的地层对比和沉积学研究，隔、夹层的分布也可作为一种类型的流动单元定量划出，最终建立以流动单元为基础的三维定量地质模型。该类方法强调成因单元（或沉积相带）内影

响流体渗流的地质参数的差异性，并应用多种参数进行流动单元划分，但对成因单元本身的分布、单元间渗流屏障（沉积屏障、成岩胶结带和断层遮挡）及各种地质界面的研究不够。第二类是近年来刚刚兴起的以地质研究为主的储层层次分析法，即应用高分辨率层序地层学研究储层流动单元。高分辨率层序地层学用于储层流动单元研究，是在不同级次基准面旋回划分对比的基础上，探讨基准面旋回层次性与储层流动单元间的关系，并采用层次界面和层次实体描述来分析储层流动单元的层次性。

本书研究储层流动单元的方法吸收了上述两类方法的优点，做到了定性与定量的结合。以鄂尔多斯盆地大牛地气田下石盒子组河流相沉积为研究对象，针对河流相沉积的特点，以测井、钻井、地震、测试、试采及化验分析资料的综合研究为基础，应用高分辨率层序地层对比技术、沉积相精细分析技术、储层非均质性研究技术、层位标定技术、地震资料特殊处理技术、多井测井约束反演层序地层分析技术、储层横向参数三维预测技术及各种图形编辑与输出技术；通过高分辨率地层层序划分、不同级次等时地层格架的建立，以及对沉积物的地层堆积样式、相序、相类型、岩性、岩石结构、几何形态、连续性、岩石物理特征及含气性分析，查明单期河道砂体的三维集合形态与空间分布特征、解剖多期砂体的空间叠置与组合关系；并在此基础上开展储层非均质分析和流动单元研究，探讨沉积微相、砂体叠置模式、储层非均质性及储层流动单元发育特征与不同级次基准面旋回的关系；对气藏精细描述、气藏数值模拟、产能预测、储量估算及气田开发方案的制订和完善具有重要的指导意义。同时，对丰富和探索河流相地层层序分析、储层非均质分析及储层流动单元研究方法具有重要的理论意义。

中国地质大学（武汉）的王华教授对本书的初稿进行了认真审阅并提出了许多宝贵的意见；中国地质大学（北京）的邓宏文教授在高分辨率层序地层学理论方面对作者进行了热情指导；中国地质大学（武汉）的赵彦超教授在储层非均质性研究方面对作者进行了热情指导；中国石化集团华北石油局郝蜀民总工程师、华北石油局勘探开发研究院的陈召佑院长、赵舒总工程师在科研工作中对作者给予了大力支持与帮助。在此，一并致谢！

本书素材主要来源于作者的探索性研究成果，供读者参考和借鉴。不妥之处敬请批评指正。

目 次

前 言

第一章 绪论	(1)
一、层序地层学的起源、发展历程及存在问题	(2)
1. 层序地层学的起源与发展历程	(2)
2. 层序地层学存在的主要问题	(4)
二、主要层序地层学派的基本原理、优势与局限性	(5)
1. 经典层序地层学	(5)
2. 成因层序地层学	(12)
3. 高分辨率层序地层学	(12)
三、储层流动单元的研究现状、发展趋势及存在问题	(17)
1. 储层流动单元的研究现状	(17)
2. 储层流动单元研究的发展趋势	(19)
3. 存在问题	(20)
四、高分辨率层序地层分析与储层流动单元的研究意义、研究方法与技术路线	(21)
1. 研究意义	(21)
2. 研究方法	(21)
3. 技术路线	(21)
第二章 研究区地质概况	(24)
一、鄂尔多斯盆地区域地质概况	(24)
1. 自然地理概况	(24)
2. 构造位置及构造区划	(25)
3. 演化简史	(26)
二、鄂尔多斯盆地油气勘探进展及油气分布特征	(28)
1. 油气勘探进展	(28)
2. 油气分布特征	(29)
三、大牛地气田地质概况	(30)
1. 构造位置	(30)
2. 地层简述	(30)
3. 烃源岩与盖层	(33)
4. 下石盒子组储层特征	(34)
5. 气藏类型	(35)
第三章 高分辨率地层层序识别与划分	(37)
一、基准面旋回的控制因素	(37)

二、基准面旋回的识别	(39)
1. 基准面旋回的识别方法	(39)
2. 岩心剖面上基准面旋回的识别	(40)
3. 测井曲线上基准面旋回的识别	(41)
4. 地震剖面上基准面旋回的识别	(47)
三、高分辨率层序地层旋回划分及其特征	(51)
1. 地层旋回的级次划分	(51)
2. 下石盒子组钻井地层旋回特征	(57)
第四章 层序地层格架与砂体对比预测	(61)
一、基准面旋回对比	(61)
二、层序地层对比格架及其特征	(64)
1. MSC3 中期旋回及各短期旋回特征	(64)
2. MSC4 中期旋回及各短期旋回特征	(66)
3. MSC5 中期旋回及各短期旋回特征	(67)
三、短期旋回地层格架内的砂体对比与分布特征	(67)
1. 短期旋回地层格架内砂体对比的原则与方法	(67)
2. 砂体的垂向叠置与侧向迁移模式	(70)
3. 主要短期旋回内砂体的平面分布特征	(71)
四、河流相储层的综合预测	(74)
1. 精细的构造解释	(75)
2. 测井资料预处理	(79)
3. 钻井的岩性分析	(81)
4. 储层的岩石物理特征分析	(82)
5. 不同储集体模型的正演模拟	(83)
6. 砂岩储集体地震相特征分析	(83)
7. 无井约束的地震属性分析	(85)
8. 有井约束的多参数岩性反演	(86)
9. 岩性可视化解释技术	(89)
第五章 中短期旋回层序地层格架内的沉积相分析	(90)
一、沉积体系、沉积相、沉积微相类型及基本特征	(90)
1. 沉积体系、沉积相、沉积微相类型及其隶属关系	(90)
2. 沉积相主要标志	(90)
3. 辫状河流相主要亚相及微相特征	(94)
4. 曲流河相主要亚相及微相特征	(97)
二、单井沉积微相分析	(100)
1. 大 4 井 MSC3 旋回 (盒一段) 沉积微相分析	(100)
2. 大 8 井 MSC3 旋回 (盒一段) 沉积微相分析	(100)
3. 大 15 井 LSC2 旋回沉积微相分析	(101)
4. 大 16 井 LSC2 旋回沉积微相分析	(103)

三、主要短期地层旋回的沉积相平面分布及沉积演化	(104)
1. 主要短期地层旋回的沉积相平面分布	(104)
2. 中短期地层旋回的沉积相演化特征	(109)
第六章 中短期旋回内储层的非均质性研究	(113)
一、储层非均质性的概念及其影响因素	(113)
1. 储层非均质性的概念	(113)
2. 储层非均质性的主要影响因素	(114)
二、储层非均质性的分类与研究方法	(114)
1. 储层非均质性的分类	(114)
2. 储层非均质性的研究方法	(115)
三、MSC4 和 MSC5 旋回的储层宏观非均质性	(116)
1. 储层的岩性组成及非均质性	(116)
2. 短期旋回储集砂体的横向连续性	(117)
3. 短期旋回储层垂向连通性	(117)
4. 储层产能的非均质性	(119)
5. 裂缝发育程度的非均质性	(120)
四、MSC4 和 MSC5 旋回储层的中观非均质性研究	(120)
1. 层内渗透率韵律类型	(120)
2. 不同沉积微相砂体的非均质性	(121)
3. 夹层类型与分布的非均质性	(123)
五、MSC4 和 MSC5 旋回储层的微观非均质性研究	(124)
1. 储层物性分布的非均质性	(124)
2. 储层砂岩碎屑成分的非均质性	(126)
3. 储层孔隙类型的非均质性	(127)
4. 孔隙结构的非均质性	(127)
5. 成岩作用及其非均质性	(129)
六、储层物性的影响因素	(130)
1. 沉积微相与储层物性	(130)
2. 砂岩的粒度与物性	(132)
3. 砂岩碎屑颗粒成分和填隙物与物性	(132)
七、MSC4 和 MSC5 旋回储层非均质性的综合评价	(132)
(一) 综合评价参数及划分标准	(133)
1. 储层综合评价参数	(133)
2. 储层综合评价标准	(134)
(二) 储层类型的基本特征	(135)
八、储层非均质性对气藏产能的影响	(135)
1. 储层沉积相空间展布与产能关系	(135)
2. 岩性与产能关系	(136)
3. 孔隙结构与产能关系	(137)

4. 储层非均质参数与产能关系	(137)
第七章 中短期旋回等时地层格架内的储层流动单元研究	(139)
一、流动单元的内涵及研究意义	(139)
1. 流动单元的内涵	(139)
2. 流动单元的研究意义	(139)
二、流动单元的成因分类	(140)
1. 断层控制的流动单元	(140)
2. 隔层控制的流动单元	(140)
3. 夹层控制的流动单元	(140)
4. 渗透率韵律控制的流动单元	(141)
5. 层理构造控制的流动单元	(141)
6. 裂缝控制的流动单元	(141)
7. 孔隙结构控制的流动单元	(141)
三、流动单元的研究方法	(142)
1. 露头沉积界面分析法	(142)
2. 沉积岩相分析法	(142)
3. 参数分析法	(142)
4. 层次分析法	(143)
四、基准面旋回与流动单元的层次性	(143)
1. 基准面旋回的层次性	(143)
2. 流动单元的层次性	(144)
五、流动单元的参数选取与识别	(145)
1. 主要参数及相关性分析	(145)
2. 流动单元的参数选取及分类	(149)
六、单井流动单元的识别与评价	(150)
1. 不同参数划分流动单元类型的结果对比	(150)
2. 取心井的流动单元识别与评价	(150)
3. 非取心井段的流动单元识别与评价	(152)
七、流动单元剖面结构分析	(155)
1. 流动单元的隔挡层类型	(155)
2. 小尺度流动单元的垂向叠置样式与侧向分割特征	(157)
3. 基准面旋回与流动单元的关系	(159)
4. 流动单元与岩石物理相	(160)
八、流动单元平面分布特征	(162)
九、流动单元随机模拟及开发效果分析	(164)
1. 流动单元随机模拟	(164)
2. 流动单元空间分布特征	(165)
3. 开发效果分析	(165)
主要参考文献	(166)

第一章 绪 论

油气勘探的历史证明，每一次新理论和新技术的诞生都推动了油气勘探工作的飞跃。

1861 年，加拿大地质学家和化学家 T·斯特里·亨特 (T. Sterry Hunt, 1861) 提出的“背斜理论”，为油气勘探指明了方向。

1954 年，李四光根据地质力学理论研究新华夏系所取得的认识，推断这个体系沉降带内的某些段落中存在着油气藏 (谭忠福等, 1989)，推动了中国 20 世纪 50 年代油气勘探由西部向东部的大转移，为在松辽盆地找到大庆油田作出了理论和战略上的贡献。对逆冲推覆构造的研究和认识，也打开了找油的新思路、新方向、新领域 (王燮培等, 1990)。断块构造、古潜山、披覆构造、底辟构造、同生断裂和滚动背斜、地层圈闭等的深入研究，一次又一次地将油气勘探工作推向一个又一个的高峰。

20 世纪 70 年代末期，根据板块构造理论重新认识盆地的成因及其与板块构造格架的关系，曾导致盆地研究的一次飞跃。从板块构造背景及其相互作用出发重新识别划分了沉积盆地的类型，研究沉积盆地的沉降机制及其与油气聚集的关系，使沉积盆地的研究从朴素的描述和归纳发展到深层次的宏观理论分析。T. P. Harding 和 J. D. Lowell 的构造样式概念和构造样式分类 (T. P. Harding & J. D. Lowell, 1979; T. P. Harding, 1984, 1985) 把近代的板块构造理论研究引入到实际的油气勘探领域，把盆地构造和盆地内油气圈闭的构造研究与板块构造的部位、性质和演化紧密地联系在一起，从而使油气聚集的构造分析，在认识上大大提高了一步。

20 世纪 70 年代末期到 80 年代初期，Tissot 等的有机生油理论与生油模式 (Tissot 等, 1978; Durrand, 1980)，Schowalter 等的油气运移聚集原理 (Schowalter, 1979; Robert, 1980; Chapman, 1982)，奠定了现代石油地质学的理论基础。有机成油理论将油气勘探指向了富含有机质的沉积盆地；源控油气理论又将油气勘探的有利地区限定在沉积盆地内有源岩分布的范围内及周边区域；圈闭控油理论有的放矢地将勘探靶区指向了油气运聚区内的富集场所；诞生于我国的陆相成油说，丰富和发展了石油地质理论，极大地拓展了找油领域，“这一非海相生油的观点为全国解放后大庆油田的发现拔除了理论障碍” (翁文波, 1982)。

20 世纪末期崛起的层序地层学 (P. R. Vail, 1987)，是建立在地震地层学、测井地质学、过程沉积学、古生物学、同位素地质学等多个学科基础上的研究等时年代地层格架中具有成因联系的、旋回岩性序列间相互关系的综合学科，是现代地质学中具有强大生命力的一个前缘分支学科。它以其独特的概念体系及技术支撑体系，变革了传统地层学和沉积学的理论，改变了分析世界地层记录的基本原则 (顾家裕, 1995)，成为现代地质科学的一场革命 (P. R. Vail 等, 1991)。由于其思路的先进性和资源预测的有效性，引起地质学不同领域的许多学者的广泛重视。其突出贡献在于以综合露头、钻井、测井和地震资料等综合信息进行地层层序叠置样式研究，从根本上解决了地层对比的穿时问题，为油气勘探中烃源岩、盖层、油气储层的预测、圈定及描述提供了强有力的技术支撑。层序地层学在

对各种不同类型盆地和构造位置中的相和环境变化的预测效果以及对地层解释的积极影响等方面，不亚于板块构造理论对构造地质的影响。

一、层序地层学的起源、发展历程及存在问题

1. 层序地层学的起源与发展历程

层序地层学是20世纪70年代末由美国Rice大学P. R. Vail及其在Exxon公司的同行R. M. Mitchum和J. B. Sargree等在地震地层学基础上创立起来的一门新的地层学分支科学(罗立民, 1999)。回顾它的发展历程, 大致可分为3个阶段。

(1) 层序地层学萌芽阶段(20世纪40年代末至60年代)

1948年, Sloss等在北美地质学会年会的沉积相和地质历史研讨会上首次提出了“层序(sequence)”的概念, 将“层序”定义为“一种以不整合面为边界的地层单位”, 并在北美克拉通晚寒武世至全新世地层研究中, 率先创造性地应用“层序”进行了地层划分, 将北美稳定克拉通的地层记录从晚前寒武纪直至今划分出6个层序, 分别由6个主要的不整合分隔(Sloss, 1963)。此后的30年间, 尽管Sloss的思想及层序的概念一直未被广泛接受, 但却为当今层序地层学的发展奠定了概念基础。

(2) 地震地层学的成熟及经典层序地层学的形成阶段(20世纪70年代)

1974年, Frazier研究了密西西比河三角洲复合体的沉积学和地层学, 认为地层是由相层序及沉积幕形成的沉积复合体, 强调了由海进面限定的地层组。

《地震地层学》(Vail等, 1977)和《地震地层学在油气勘探中的应用》(Payton等, 1977)等著作的出版, 标志着地震地层学已进入发展成熟期, 也正是地震地层学的成熟推动了经典层序地层学的诞生。

1977年, Vail等应用和发展了Sloss的层序概念, 把层序的形成看成是对全球海平面变化的响应, 为层序地层学的诞生奠定了基础。他们提出了海平面相对升降的概念以及由此引起的在地震剖面资料上可以识别的以不整合为界的地层型式, 建立了一套主要依据地震资料进行层序分析的方法技术体系; 明确层序是以不整合面及与之可对比的整合面为边界, 在成因上有联系、具有旋回结构并可置于年代地层框架内的一套沉积地层; 应用地震、钻测井资料确定和预测盆地地层结构、沉积相类型及其区域分布, 建立了被动大陆边缘盆地地层分布模式, 为此后建立具有成因意义的层序演化模式(H. W. Posamentier等, 1988; Galloway, 1989)奠定了基础。因此, 这一阶段对层序地层学的发展具有极其重要的意义。

(3) 层序地层学的发展完善和全面应用阶段(20世纪80年代至今)

1987年, Vail和Galloway分别发表了“层序地层构型”和“沉积幕的理想地层构型”, 形成了完整的概念模型和术语体系。同时, Haq通过将全世界各地区的海相露头层序地层特征进行编年和年代标定形成了海平面旋回变化图, 引起了广泛关注。1988年, 《海平面变化综合分析》(Vail等, 1988)、《层序地层学工作手册》、《层序地层学基础》(Sargree和Vail等, 1988)、《海平面变化——一种整体性的研究》(Wilgus等, 1988), SEPM《层序地层学特刊》(Van Wagoner等, 1988)、《测井、岩心、露头研究中的硅质碎

屑岩层序地层学》(Van Wagoner 等, 1990) 以及 Mitchum 等 (1991) 有关层序地层学著作的问世, 发展了沉积学中的层序、体系域等概念, 并分别以初次海泛面和最大海泛面把一个完整的层序划分为 3 个体系域, 详细定义了层序与层序类型、层序界面及类型、沉积体系域、初始和最大海泛面、层序级别、准层序和准层序组、凝缩层和可容纳空间等一系列相关概念 (R. M. Mitchum 等, 1977; R. M. Mitchum 等, 1991)。突出地强调海平面升降变化的全球性和周期性以及构造沉降、全球海平面升降、沉积物供给速率及气候等 4 个基本变量对地层单元几何形态与岩相组合的控制, 使经典层序地层学理论体系得到了进一步完善和发展。同时, 1988 年 9 月在法国迪涅召开的全球沉积地质委员会 (GSGC) 会议决定将“层序地层学和全球海平面变化”正式纳入全球沉积地质计划 (GSGP), 从而开始使“层序地层学”面向世界, 并进入了理论研究和生产应用全面发展时期, 成为地学界的一大亮点和热点。

自 1988 年以来, 层序地层学在理论和实际应用方面都进入了辉煌的发展时期, 成为地学的一大亮点和热点, 并取得了多方面、多层次的进展。

1) 三大支柱体系各具特色、多种学派精彩纷呈: 在理论上呈现了以 Vail 等 (1977) 为代表的经典层序地层学、以 Galloway (1989) 为代表的成因层序地层学以及以 Cross (1993, 1994) 为代表的高分辨率层序地层学等各具特色和优势的三大支柱体系, 并派生出了高频率层序地层学 (Van Wagoner 等, 1988)、成岩层序地层学 (A. kihiro Kamo, 1993)、生物层序地层学 (殷鸿福等, 1995)、层序充填动力学以及应用层序地层学等边缘科学。

2) 研究对象与理论模式广阔: 层序地层学已经在不同类型的沉积盆地中得到了广泛应用, 并初步建立了湖相沉积 (Johnson 等, 1987; Dunkelman 等, 1988; Scholz 等, 1991; Xue 等, 1995; Aigner 等, 1996)、断陷湖盆 (魏魁生等, 1994, 1996, 1998, 2003, 2004; 王东坡等, 1994, 1998; 顾家裕, 1995; 纪友亮等, 1996; 姜在兴等, 1996, 2002, 2003; 解习农等, 1994, 1996)、坳陷湖盆 (王东坡等, 1994; 顾家裕, 1995; 郑荣才等, 1996, 2000)、前陆盆地和百色走滑盆地 (郑荣才, 1998; 郑荣才等, 1999, 2000)、冲积地层 (Shanley, 1992, 1993; MC Cabe, 1993; Wright Marriott, 1993; Olsen 等, 1995; Van Wagoner, 1995) 及风成沉积 (Havholm 和 Kocurek, 1991) 等不同沉积类型的陆相盆地的层序地层模式, 取得了很好的科研与应用成果。

3) 研究手段多样: 快速引进大量高新科学技术是层序地层学的一个显著特点。目前, 层序地层已经从最初主要依靠地震、钻井资料发展到地震、钻井、测井、露头剖面、古生物组合及古生态、地球化学、成岩演化、磁性地层以及现代计算机技术等多种手段综合应用的新阶段, 并开始实现宏观地质调查与微观测试分析、定性描述与定量刻画、模拟的充分结合, 更加强调多学科交叉渗透与整合发展。如利用地面穿透雷达 (GPR) 对巴西潘雪拉盆地 Vila Velha 砂岩中冰川河道舌形体进行三级沉积层序海侵体系域的内部组成分析, 三维几何形态的描述 (Marques 等, 2000); 利用深度分辨率相当于 10m 的三维地震图像和测井资料进行四级高频层序体系域、层序边界和层序的识别与编图 (Zeng Hongliu, 2001); 用定量化的 FMI 测井资料校正高分辨率层序地层图, 标定不同等级的沉积旋回, 得出海侵期沉积物较细、储层不发育, 仅在海侵旋回的白云岩化部分发育高渗透率储层, 而海退期沉积物较粗、发育高孔渗储层, 尤其是海退的淋溶带发育高渗透率储层 (Eberli, 2001); 用碳酸盐岩碳、氧、锶稳定同位素定量测试手段 (李儒峰等, 1996; 郑

荣才, 1998) 研究海相层序地层的形成演化, 揭示稳定同位素组成变化与海平面升降、层序形成演化的关系。

4) 研究精度极大提高: 从最先主要研究三级层序发展到包括四—六级高频层序在内的多级别层序地层研究, 并以高分辨率地震、测井和精细露头层序地层学分析、高新测年技术等为依托, 研究高频沉积旋回的成因与控制因素, 对沉积演化史的刻画与层序地层的垂向演化及空间展布形态和样式的模拟再现更趋深刻与真实。如 Koleva Rekalova (2000) 研究了保加利亚东北部 Cape Kaliacra 剖面萨尔马特阶 11m 厚的由 6 个风暴层 (碳酸盐岩风暴层) 与微晶灰岩交互沉积的高频层序旋回, 认为每个风暴层沉积从一个侵蚀面开始, 侵蚀面上由风暴流高峰期块状滞留沉积组成 (灰质砾石), 向上很快变为风暴回流的最后阶段砂粒级鲕粒灰岩 (交错层理), 风暴层上部由正常气候下海侵时期的微晶灰岩退积层序盖住; Bachmann (2000) 研究了德国三叠纪干盐湖米级的砂岩—碳酸盐岩—页岩韵律旋回性沉积, 认为海侵—海退 (或更好地解释为气候潮湿—干旱变化) 形成的沉积旋回受 1 万年的米兰科维奇气候周期变化的控制。

5) 生产应用领域拓宽: 近年来, 层序地层学理论已经广泛地应用于沉积盆地分析、矿产资源评价以及油气勘探等方面, 并从初期主要为海相地层的储集、烃源岩及盖层的发育与分布的宏观预测发展到为陆相地层的储集、烃源岩及盖层的发育与分布的宏观预测、精细油藏描述、储集小层识别与对比、次生孔隙发育带预测、储层非均质性描述、岩性—地层型隐蔽油气藏 (徐怀大, 1997) 的勘探、储层流动单元及油田开发动态模拟等多领域服务。

2. 层序地层学存在的主要问题

层序地层学是一门新兴的地质学科, 正处于不断发展和完善之中, 尤其是目前研究尚不深入的陆相层序地层学, 更是面临许多亟待解决的问题。

(1) 层序级次划分目前尚无统一的工作规范

关于陆相沉积层序级别的划分, 目前方案颇多, 具代表性的主要有: ①经典层序地层学层序级次 (Vail 等, 1991) 划分, 即巨层序 ($>50\text{Ma}$)、超层序组 ($27\sim40\text{Ma}$) 和超层序 ($9\sim10\text{Ma}$)、层序 ($0.5\sim5\text{Ma}$)、准层序 ($0.05\sim0.5\text{Ma}$) 及小层序 ($0.01\sim0.05\text{Ma}$); ②王鸿祯等 (1998) 层序级次划分, 即巨层序 ($500\sim600\text{Ma}$)、大层序 ($60\sim120\text{Ma}$)、中层序 ($30\sim40\text{Ma}$) 和正层序组 ($9\sim12\text{Ma}$)、正层序 ($2\sim5\text{Ma}$)、亚层序 ($0.1\sim0.4\text{Ma}$) 及小层序 ($0.02\sim0.04\text{Ma}$); ③李思田等 (1995) 提出的陆相层序级次, 即充填层序、构造层序、层序、亚层序及小层序; ④高分辨率层序级次 (郑荣才等, 2001), 即巨旋回 ($30\sim100\text{Ma}$)、超长期 ($10\sim50\text{Ma}$)、长期 ($1.6\sim5.25\text{Ma}$)、中期 ($0.2\sim1\text{Ma}$)、短期 ($0.04\sim0.16\text{Ma}$) 及超短期 ($0.02\sim0.04\text{Ma}$)。层序界面级别的确定, 特别是地表露头剖面层序界面级别的确定, 对同一个界面, 不同研究者得出不同的认识是屡见不鲜的。目前, 在湖相沉积中采用颇多的层序级次划分仍是 Vail 等 (1991) 的层序级次划分方案, 而对于非湖相陆相层序级次的划分方案明显需要进行统一规范, 以便于对比研究。

(2) 陆相层序地层控制因素复杂、研究难度大

陆相层序地层发育控制因素的复杂性, 源于陆相沉积盆地本身具有物源多且近、沉降中心多且迁移性强、相带窄且变化快、湖盆规模和水域面积小且变化大、内部构造分异大、沉积及沉降速率差异大、区域性构造事件或幕式构造旋回复杂等特点。而且, 不同构

造沉积背景的陆相层序地层发育控制因素大不相同，不同级次层序的控制因素的巨大差异性更是为控制因素研究加大了难度。目前，对陆相盆地一级、二级低频率层序的主要控制因素是构造作用的认识争议不大；一般研究较多的是三级层序的控制因素，但还存在一些分歧；而对四—六级层序的控制因素研究，因其要求高分辨率、高精度的资料，研究程度较低，且争议颇多。

(3) 层序界面的定年测试工作薄弱

层序界面是一个等时面，已为大多数地质、地球物理学家所确认，但如何较精确地估算层序界面，如不整合、假整合面的间断时间，迄今还没有一个较精确的方法。以往曾经采用层序界面顶底生物地层、同位素地层的方法加以确定，但精度不够。

(4) 不同构造背景、不同类型陆相盆地层序地层模式有待完善

尽管不同学者已经根据各自的科研实践，探索性地总结了几类盆地（如断陷陆相盆地、前陆盆地）的层序地层模式，但由于陆相盆地类型及构造背景的差异性较大，目前所建立的层序地层模式尚未能囊括所有的盆地类型，尤其是对冲积河流相地层的层序学研究工作仍然薄弱，且业已建立的层序地层模式还有许多值得商榷之处，层序地层模式适用性脆弱，推广难度大。

(5) 层序形成过程中各种控制因素作用的定量估算难度大

陆相层序的控制因素主要包括海（湖）平面升降、构造作用、气候变化、古地形、沉积物补给、沉积负荷补偿、速率等，但如何定量估算各种控制因素在层序形成过程中的作用大小目前尚无较理想的方法。

(6) 层序地层研究成果的应用还有待推广

目前，层序地层研究成果还远未能满足生储盖和隐蔽圈闭预测评价及油气系统研究的需要，建立的层序地层划分对比方案尚难以在生产与研究中有效地应用和推广。

二、主要层序地层学派的基本原理、优势与局限性

1. 经典层序地层学

(1) 经典层序地层学的基本原理

经典层序地层学（Vail 等，1977）将“沉积层序”定义为“一套相对整合的、彼此有成因联系的地层组成的、顶底以不整合面或与之可对比的整合面为界的地层单位。”层序是层序地层分析中的基本单位，它由一套体系域组成。体系域（system tract）是指在一个层序内，同一时期内具成因联系的沉积体的组合。每个体系域都可解释为与全球海平面变化曲线的某一特定阶段相对应。层序内部可细分为准层序组、准层序、层组、层、纹层和纹层组等不同层次。

准层序组（parasequence set） 是以明显的海泛面或与其可对比的界面为界、彼此有成因联系的准层序。其垂向上构成一个特征的叠加型式。准层序组内各小层序的叠加型式有前积、退积和加积 3 种（Van Wagoner 等，1988）（图 1-1），取决于沉积速率与可容纳空间增长速率的比值。前积准层序组（progradational parasequence set）中，逐渐变年轻的小层序逐层向盆地方向沉积并可延伸较远，即反映了沉积体系不断向盆地方向进积的过

程,其沉积速率比可容纳空间增长速率大。退积准层序组 (retrogradational parasequence set) 中,逐渐变年轻的准层序,以阶梯状后退方式逐层向陆方向沉积和延伸,其沉积速率比可容纳空间增长速率小。尽管在退积准层序组中,每个准层序是向前加积的,但该准层序组在“海侵型式”中是向上加深的。加积准层序组 (aggradational parasequence set) 中,逐渐变年轻的准层序,层层向上沉积而没有大的侧向移动,即反映了沉积体系不断地垂向加积的过程,其可容纳空间增长速率接近或等于沉积速率。

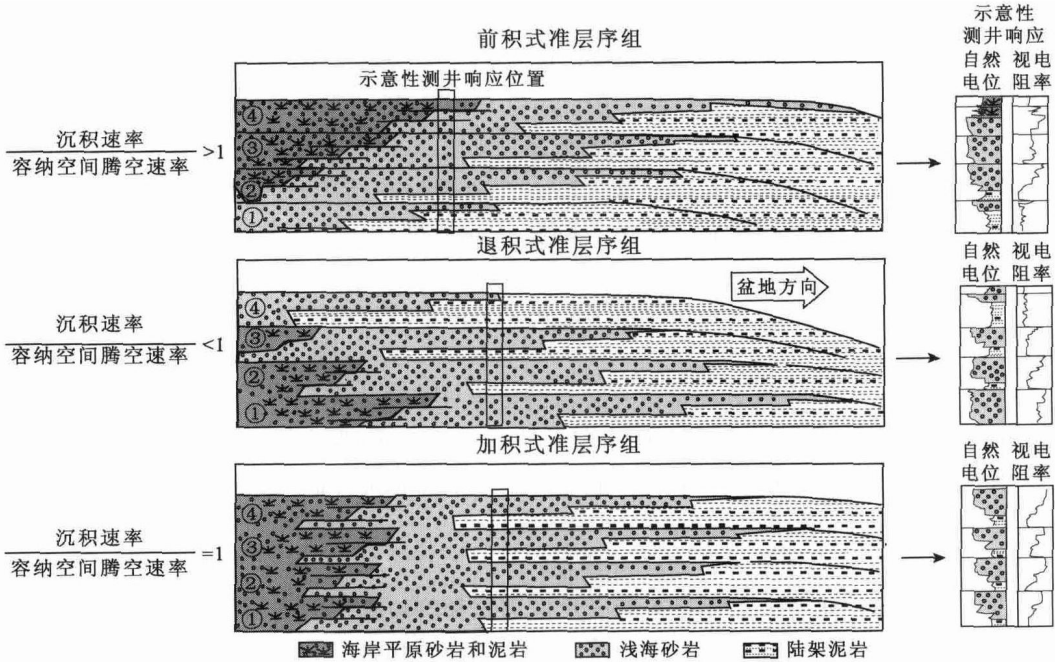


图 1-1 不同类型准层序组内部地层叠覆方式及其测井响应特征
(据 Van Wagoner 等, 1988)

准层序 (parasequence) 是由相对整合、成因上相关的层或层组所组成的序列,以海(湖)泛面和与之可以对比的面为界,相当于四级或五级沉积旋回。它是一个从局部至盆地范围的平坦面。海泛面可清楚地划分出界面以上深水环境下沉积的岩石和界面以下浅水环境下沉积的岩石。海泛面的特点是具较小的海底侵蚀作用和无沉积作用。准层序从粒序来看,可划分为向上变细(图 1-2)和向上变粗(图 1-3)的准层序,但粒序特征并不等同于水体深浅。

层组 是一套以侵蚀面(层组面)、无沉积或与其可对比的整合面为界、相对整合、有成因联系的层。

层 是一套侵蚀面(层面)、无沉积或与其可对比的整合面为界、相对融洽、彼此有成因联系的纹层。

纹层 是用肉眼可分辨的最小层。

高精度的地震反射剖面是经典层序地层分析的基础,既可以利用地震反射同相轴之间的终止关系(上超、下超和顶超)识别层序边界、最大海泛面及体系域的几何形态和展布方式、了解各个层序界面(等时面)的特点和层序内部的地层叠置关系(图 1-4, 图 1-5);也可以利用地震反射的空间连续性在二维或三维空间追踪层序界面。

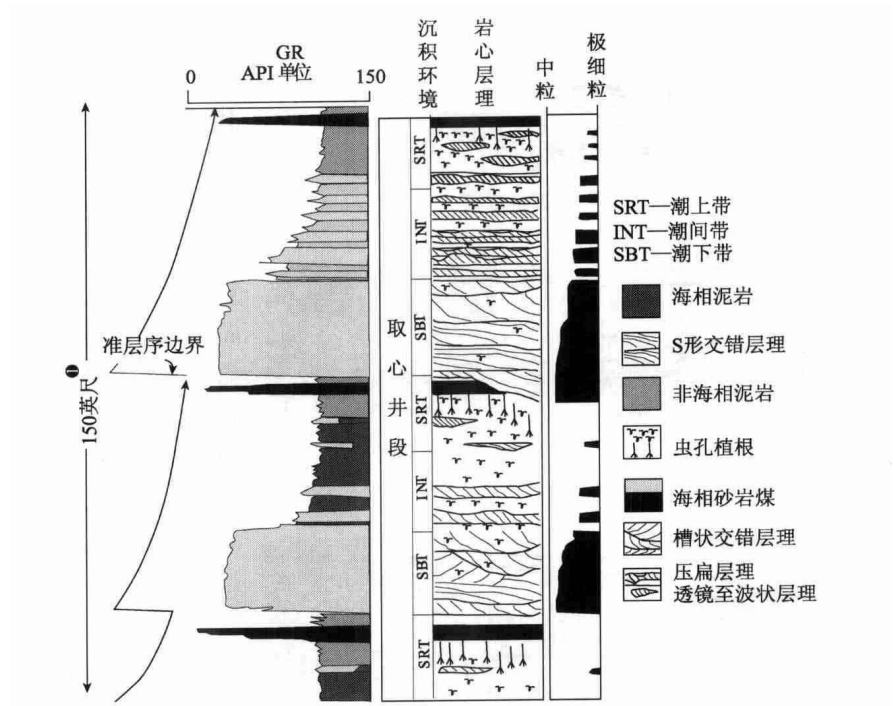


图 1-2 潮坪环境向上变细的准层序
(据 Van Wagoner 等, 1988)

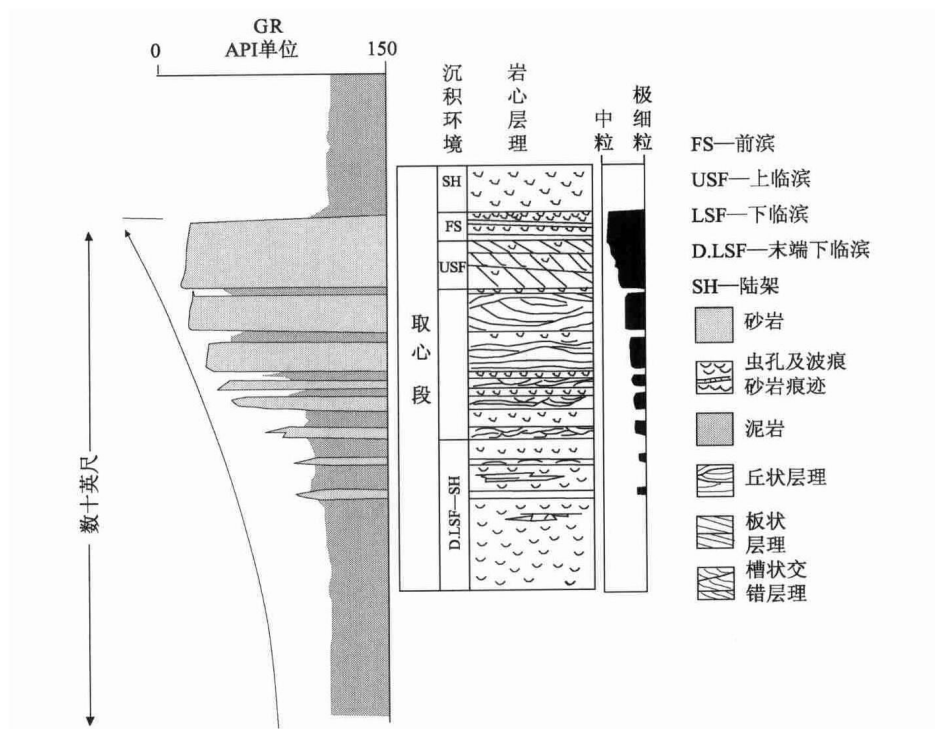


图 1-3 潮坪环境向上变粗的准层序
(据 Van Wagoner 等, 1988)

① 1 英尺 = 0.3048m。

